

三峡工程二期深水围堰的建设和研究

包承纲

(长江科学院,湖北 武汉 430010)

摘要 介绍三峡工程二期深水围堰的特点、难点和应研究的问题,从围堰型式、填料研究、防渗新材料、覆盖细砂层的动力特性、施工机具和施工方法等方面,简述了研究的概况和成果应用,以及对水利水电工程发展的意义。

关键词 深水围堰 抛填土密度 离心模型试验 柔(塑)性混凝土 三维有限元分析 三峡水利枢纽

中图分类号 TV551.3

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2001)04-0021-05

三峡水利枢纽在 1997 年 11 月 8 日成功地实现了大江截流后,如期建成了二期围堰,并经受了 1998 年汛期 8 次洪水的考验,该项工程高质量地建成,为三峡工程今后的顺利建设奠定了基础。在极其严峻的水文、地质、工期条件下,二期围堰的建成标志着中国水利水电建设又登上新的台阶,跻身国际先进水平。^[1]

1 二期围堰基本情况

二期围堰的设计和施工是三峡工程的重大关键技术项目,它由上、下游两座围堰组成,是三峡工程中重要的和最具有挑战性建筑物之一。

上游围堰堰顶全长 1440 m,最大高度 82.5 m,运用期长达 5 年,实际上是一座大型土石坝工程。堰址河床有厚达 10 m 的砂砾石层和最大厚度达 18 m 的新淤积粉细砂层。基岩系闪云斜长花岗岩,风化壳厚达 40 m 左右。在风化壳内含有一定数量未风化的球状块体,直径 1~3 m,堆积在河床覆盖层中,形成架空块体夹砂层,透水性很强。围堰形式最终选定为风化砂和石碴填筑的堰体内建混凝土防渗墙的方案(见图 1 和图 2)。

围堰建设的难度是显而易见的,运行中绝对不允许出事,否则不仅给整个工程建设造成不可估量的损失,还将严重威胁下游人民的生命和财产的安全。因此,国务院审查三峡工程初步设计时确定将二期围堰列为八个单项技术设计之一,由三峡工程开发总公司技术委员会成立专门专家组负责指导和审查。^[1]

从技术角度看,三峡二期围堰的难点大致有如下几个方面:

a. 围堰高,工程量大,要求在一个枯水季完成,施工期短,施工强度大,上下游围堰土石方填筑强度最大近 300 万 m^3 /月,防渗墙约 1.5 万 m^3 /月。

b. 施工水深达 60 m,三分之二以上的堰高在水下施工,难度很大。

c. 堰地质情况复杂,覆盖层中有较厚且疏松的粉细砂层。两侧滩地存在残积块球体夹砂层,透水性强,防渗处理困难,河床基岩面起伏较大,专山珠基岩深槽槽深高程 7 m,侧边坡很陡,超过 70° ,给防渗墙嵌入基岩带来很大困难。

d. 防渗土料缺乏,可利用的堰体风化砂填料性质较差,故堰体变形较大,防渗墙的工作条件恶劣。

e. 由于截流水深,流量大,增加了截流难度。为此,为减小水深采取了平抛砂砾石垫底等措施,但同时也给围堰建设带来一些新问题,如堰体的渗透稳定问题等,并增加了防渗墙造墙的困难。

为解决上述难点,有多达三四十个技术课题需要研究,其中不少是以往国内外很少遇到过的,这就使二期围堰成为三峡工程中多方关注和担心的焦点之一。

总的说来,二期围堰的课题可以概括为下述五个方面:

a. 填料特性研究。填料包括风化砂、石碴、风化砂与粘性土混合料、反滤料等,其中风化砂在 60 m 水深中抛填密度将是围堰设计首先应解决的问题。

b. 围堰的结构形式研究。围堰的结构形式是风化砂和石碴堰体,中间设混凝土防渗墙结构,但是堰体断面的布置,尤其是 60 m 水下部分布置可以有很多方案,如何设计一个既安全又经济合理的断面是

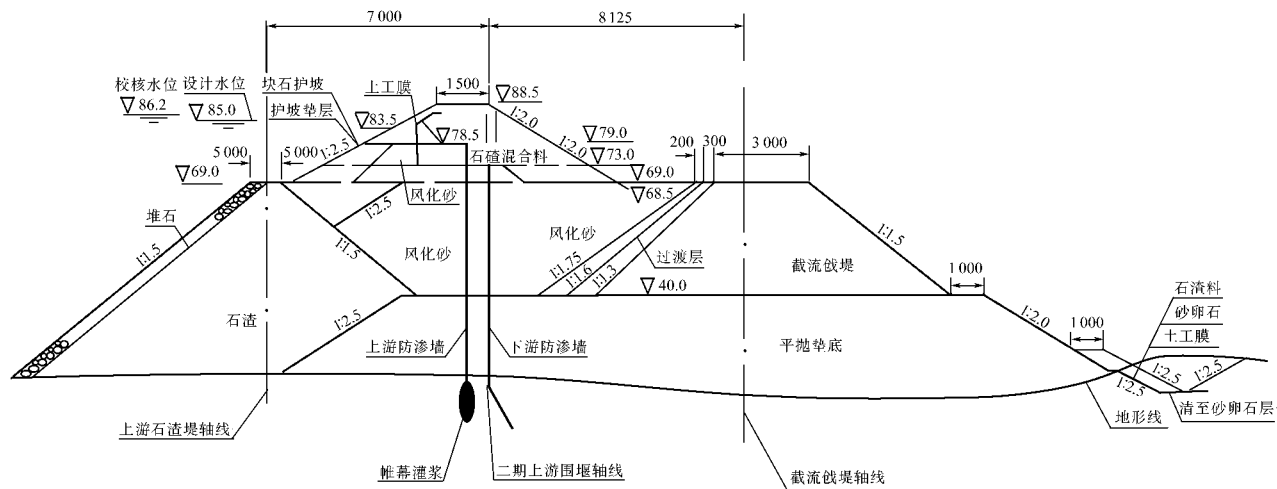


图1 二期上游横向围堰典型剖面图(单位:cm)

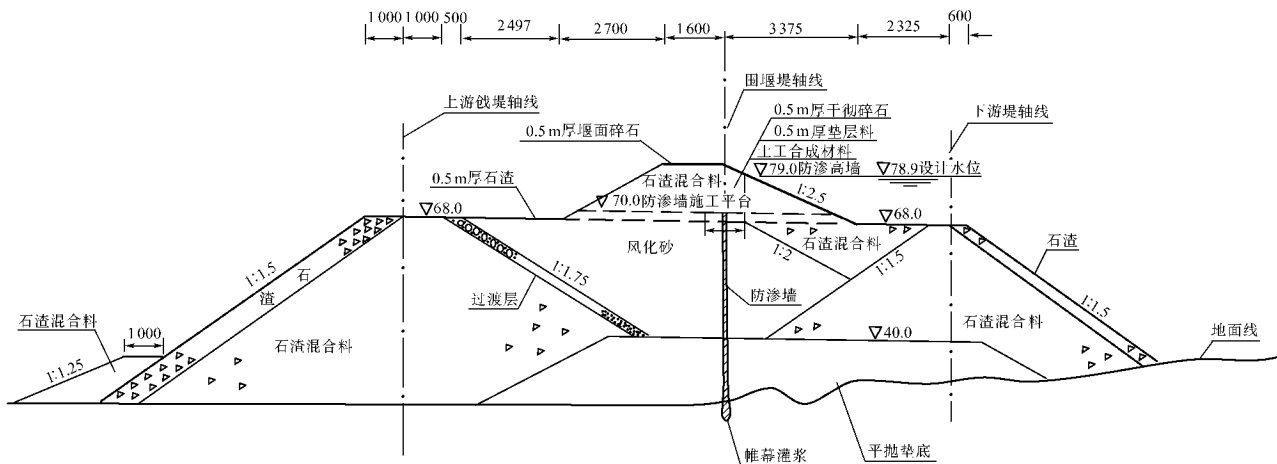


图2 二期下游横向围堰典型剖面图(单位:cm)

一个值得研究的问题。

c. 防渗材料的研究. 由于堰体填料的性质很差,可以预见二期围堰的变形将较大,用什么材料建造防渗墙直接关系到围堰的安全挡水。

d. 堰基粉细砂层和覆盖层的特性和处理. 粉细砂层是由于葛洲坝工程回水而新近沉积在堰址的,它的抗液化能力弱,渗透稳定性和动力强度以及由此引起的对围堰稳定性的影响是值得注意的。

e. 施工方法和快速施工设备研究. 二期围堰的施工有很多特点,如在 60 m 水下施工,70 多米深的风化砂堰体中建防渗墙,块球体处理等. 与此相关的课题有堰体加密措施,建防渗墙的方法和机具,块球体夹层的防渗问题等。

2 二期围堰关键技术的研究概况

三峡二期围堰的研究工作最早始于 1958 年,当时提出过许多方案,并对 60 m 水深下风化砂抛填体的密度进行了现场抛填试验. 20 世纪 80 年代以来,对二期围堰方案进行过重点研究,并先后与美、加、意等国进行过合作与咨询. 1985 年结合三峡工程论

证提出过三个对比方案,1987 年开始的“七五”攻关和 1992 年正式起动的“八五”攻关是对二期围堰进行深入研究的主要阶段,该两次攻关研究,基本上解决了存在的关键技术问题,并分别为初步设计和单项技术设计提供了主要技术依据和有关参数,使二期围堰的方案得以成立. 在其后,当围堰进入实施阶段,结合实际条件的变化,又进行了补充研究和施工科研工作,使围堰建设方案更趋完善。

从 1985 年开始至 1999 年,二期围堰在长达 15 年的研究历程中,有许多经验和体会是值得回顾和总结的。

二期围堰的两次国家重点科技攻关,以及施工阶段的科研工作,均取得了重大成果,为初步设计、技术设计及施工中某些技术问题的解决奠定了基础,其意义和价值是很大的,在这里,“科技是第一生产力”的论断得到了充分体现。

3 二期围堰型式的研究

二期围堰型式的研究是该项课题研究的重点,持续时间长达 15 年,投入的人力最多,国内先后有

来自高等院校、科研单位和设计及工程单位的 50 多位专家参与,围堰建设中许多问题都是通过计算分析与对比而作出决策和进行优化的。

三峡二期围堰设计是一种新的探索,以往土坝和围堰建设中很少遇到类似的建坝条件.为研究风化砂在 60 m 水深中抛填的密度,1959 年在坝址右岸石板溪拦沟蓄水,进行了 6.0 m 水深下人工挑土的现场抛填试验,所得的干密度很低,仅 $1.40 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$,按此计算混凝土防渗墙顶部的水平位移达 1.2 m 左右,墙的应力应变的状况不佳,设计方案难以过关.在 20 世纪 80 年代,由于该问题的存在,围堰方案的研究困惑多年,难以取得有意义的进展.‘七五’攻关后期,长江科学院建议用离心模型试验技术来解决这个难题,取得了良好的水下密度近似值,该值后来又进一步为二期围堰的实践所验证,按此确定的干密度达 $1.67 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$,大大高于 6 m 水深下的现场试验,此项成果为初步设计提供了重要的技术基础,使围堰设计方案得以成立.因此可以认为,它是围堰设计中的一个飞跃.同时,在技术上也是一项开创性的成果。

进入 20 世纪 90 年代以来,二期围堰方案是围绕‘5 个因素 10 个字’的分析比选而进行的,这就是刚柔、单双、高低、厚薄和先后。

所谓‘刚柔’就是墙体材料是选用刚性混凝土还是柔性混凝土材料.这是一个很关键的问题.围堰的设计是以普通混凝土的刚性墙为基础的,由于应力和变形状况不佳,墙端部单元的应力水平过大(图 3),工程不够安全,为此曾企图以加大混凝土的强度,采用固本强身的方法来解决.但墙体的最大变形并未明显减少,经过多次计算分析,才发现墙体的变形在更大程度上取决于堰体的变形.这样一个简单的认识是在经过长达 10 来年的历程才取得的,由此将防渗墙的设计转到‘柔’的思路上来,即拟采用柔性混凝土和塑性混凝土作为墙体的材料,它的 28 d 抗压强度为 $4 \sim 5 \text{ MPa}$,而其弹模在 1000 MPa 左右,因此墙体的应力和变形情况大为改善(图 4).这种设计思想的转变是二期围堰设计中的又一个飞跃.所谓‘单双’就是围堰的深槽段防渗墙高近 80 m,该段围堰是采用单道墙,抑或双道墙.所谓‘高低’就是指防渗墙是全部采用混凝土墙,还是墙上部接土工合成材料防渗,以降低墙的高度.前者即为‘高墙’,后者则为‘低墙’.所谓‘厚薄’是指墙厚多少才能满足应力应变的要求.所谓‘先后’是指在双墙方案中上游第一道墙是先打还是后打.因为该问题涉及围堰的加荷路径问题,对墙体的位移和应变状况会有很大的影响.同时该问题也涉及两墙间的水位控制问题。

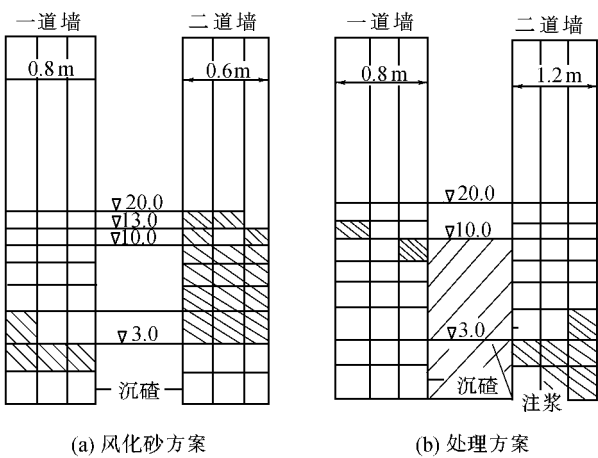


图 3 高双墙方案破坏单元位置示意及应力 (允许抗压 15 MPa,抗拉 1.5 MPa)

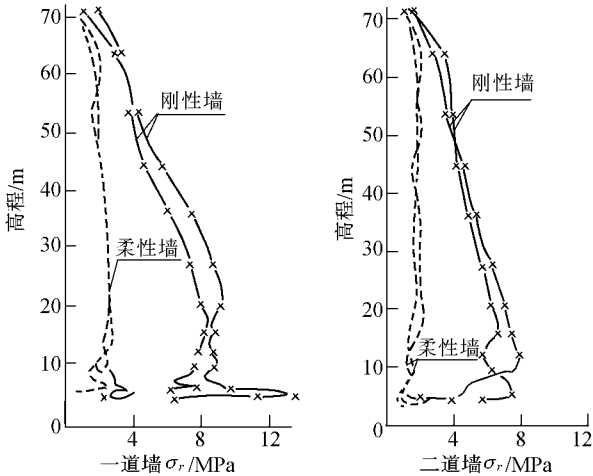


图 4 柔、刚性墙方案的墙体应力分布 (墙厚 1.0 m)

上述几个因素的研究成为‘八五’攻关的主要内容,也是技术设计中的重点内容之一,所需用的技术手段是有限元计算分析和试验,以及与现场测试的互相验证,研究条件力求与施工一致,并以施工实况为依据进行追踪分析或反馈分析,因此研究的针对性和真实性都是很强的。

4 填料性能研究

4.1 风化砂和石碴混合料的特性

风化砂是工程开挖出来的废料,用于围堰填筑不仅就地取材造价低廉,而且废物利用有利环保,故具有良好的经济和社会效益.但以往对风化砂研究很少,对它的力学特性和压实性质了解不多,尤其是颗粒的易碎和不稳定性将会给长期运用带来什么影响值得关注。

4.2 粗粒料的大型试验

风化砂和石碴中含有许多粗颗粒,有的粒径很大,为此需配备大尺寸试样的仪器.为二期围堰试验而研制的仪器包括大型三轴仪($\varnothing 50 \text{ cm}$ 和

($\varnothing 30\text{ cm}$),大型击实仪($\varnothing 50\text{ cm}$),大型渗压固结仪(叠环式,环间有弹性橡胶圈,试样直径 50 cm ,高 100 cm ,可以进行压缩和渗透试验),以及大型平面应变剪切仪.后者是一种新的试验设备,它的受力情况更接近堤坝的实际工作状态,因此所取得的强度特性更真实.试样尺寸有两种,分别为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 和 $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 40\text{ cm}$,在国内尚属首创,在国际上同样规模的仪器也仅有2台,该仪器所做的试验为设计提供了更为合理可靠的参数.

4.3 风化砂颗粒的破碎特性及其力学性质

由于围堰较高,应力较大,而风化砂颗粒比较软弱,当经受压力和剪切时易破碎,从而影响力学特性.颗粒破碎与力学性质的关系在土力学中是一个新课题,它的研究不仅对三峡工程有价值,且在当前面板堆石坝风行的潮流下也具有普遍的意义.研究表明,风化砂的剪切破碎率达20%以上,破碎分量可以看作一个强度分量.这样就加深了对粗颗粒材料强度特性的认识,使有关参数更具有充分的依据.

4.4 水下抛填风化砂的密度和坡角的研究

风化砂抛填体的密度研究是一个十分重要的而又困难的问题,采用离心模拟技术解决这个问题属于首创,其方法简单,节省费用,而成果比较合理,据此提供的风化砂密度和水下稳定坡角,可以大大简化围堰断面结构和减少工程量,使风化砂围堰体的坡角由1:3变为1:2,该项成果具有良好的实用价值和理论意义.

5 防渗新材料的研究

防渗新材料是指常态混凝土以外的材料,包括风化砂柔性混凝土、石屑粉塑性混凝土以及土工膜等,此外还曾研究过乳化沥青和沥青混凝土等.

5.1 风化砂柔性混凝土

风化砂柔性混凝土是以开挖的废料风化砂和水泥、粘土(或膨胀土)为主要原材料,掺合一定的添加剂配成的,该项研究持续了10多年,初期进行了几百组的室内配比试验,然后在3个工程中加以应用.“八五”攻关时,又在以往的经验基础上进行了新一轮的研究,在配方研究中采用了先进的均匀设计理论,进行了“3因素10水平”的配比优选试验,在此基础上用人工神经网络技术建立了原材料含量与力学指标关系的ANN模型,并绘成图谱,可以任意选定原材料的配方.此研究成果在现场应用得十分成功,达到施工方、造价低廉、质量满足要求的目的,其模强比达到200~250,在国际上都是很先进的.风化砂是一种废料,对它的利用将有利于环境保护.

5.2 用弃料配制塑性混凝土的研究和应用

三峡工程二期围堰采用塑性混凝土为墙体材料之一,其技术参数为,抗压强度不低于 5 MPa ,抗折强度不低于 1.5 MPa ,初始切线模量 $700 \sim 1000\text{ MPa}$,渗透系数不大于 10^{-7} cm/s ,破坏渗透比降不小于80.

制作塑性混凝土需大量细砂,在二期围堰施工中,长江天然河砂料源不足,而古树岭人工骨料系统在生产碎石后有大量粒径小于 5 mm 的弃料,因此研究了利用弃料配制塑性混凝土.这种弃料的细度模数约为3.02,含石量9.87%,石粉10.4%,视比重2.64,吸水率2.0%,经与42号矿渣水泥、膨润土和外加剂组合,进行配合比试验,优选推荐了施工配合比,并做了三轴试验和渗透试验,测定非线性模型参数.塑性混凝土在围压 σ_3 为 $0 \sim 0.7\text{ MPa}$ 范围内, E_1 为 $1025 \sim 1239\text{ MPa}$, $(\sigma_1 \sim \sigma_3)_f$ 为 $4.06 \sim 5.91\text{ MPa}$, $c = 1.11\text{ MPa}$, $\varphi = 34.3^\circ$,渗透系数 $k = 0.8 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$,破坏坡降 $J > 300$,满足设计要求, $E-\mu$ 、 $E-\beta$ 模型参数也在合理范围内,弃碴中云母含量高,不适用于永久建筑物,但对围堰防渗墙并无影响.这一做法可变废为宝,对降低造价、解决资源和减轻环境污染都起到了很好的作用.

三峡二期围堰防渗墙新材料的研制成功,使“柔”的设计思想得以实现.因此可以认为它是围堰建设中的又一个飞跃.

5.3 复合土工膜

围堰防渗是土工膜应用的合适场所,它的防渗性好,适应变形能力强,施工简便,拆除容易,又不存在老化问题.“八五”攻关期间的研究表明,复合土工膜(二布一膜)的性能并不是土工膜和无纺织的简单叠加,而是更优一些.研究中对它的设计方法也提出了新的建议.二期围堰共使用复合土工膜约 6 万 m^2 ,均为国内生产.

6 堰基粉细砂层动力特性研究和处理

6.1 新淤粉细砂层的液化研究

堰基新淤粉细砂层粒径细而均匀,密度较低,是一种动力稳定性和渗透稳定性较差的土.二期围堰由于运用期较长(5年),因此需考虑地震作用下的性能.本项课题用多种方法进行了淤砂的动力性能试验和液化判别,并在现场测定了淤砂层的波速,确定了临界剪切波速值.研究表明,在深度 $5 \sim 10\text{ m}$ 以上的浅层,存在着7度地震下液化的可能性.渗流试验表明,淤砂的水平允许渗透比降为 $0.22 \sim 0.27$,抗冲流速仅为 $0.07 \sim 1.13\text{ m/s}$,说明其抗冲能力和渗透稳定性均较差,因此要采取一定的工程措施.

6.2 围堰的地震稳定性

围堰的地震稳定性问题可能由堰基新淤砂和堰体风化砂引起,因此对两种土在地震荷载下的动力强度进行了研究,并进而对围堰进行了动力稳定分析.研究表明,由于新淤砂的高液化度使经过淤砂层的深层滑动面安全系数最小,仅为 1.05 和 0.95(两个滑动面).而风化砂本身的地震动力反应不大,对工程没有很大的影响.

如何对待淤砂层曾有过不同的考虑,采用硬性挖除的办法可能比较彻底,但是很困难,而且可能回淤,不易清理干净.反之,对其不加处理,直接在淤砂上面建围堰也是很危险的.

建议工程措施 ①增大围堰上游坡压重的范围,厚度不小于 10 m;②下游新淤砂出露处用土工布反滤层围封;③在下游新淤砂层上增加一定的压重,厚度不小于 10 m.

6.3 爆振荷载下围堰稳定性研究

基坑爆破开挖会引起频繁的和强烈的振动,它对新淤砂的影响如何,是否危及堰体稳定,为此做了专门研究.

由于爆振荷载属于冲击型荷载,频度虽高,幅值虽大,但持续时间很短,频谱较单一,衰减快,振源浅,故影响范围不大.其破坏性不如地震大,不会对围堰稳定造成很大影响,只要对爆破的能量加以一定控制,并且不直接在粉细砂层内施爆,则不会危及围堰的安全.

7 施工方法和施工机具研究

7.1 加密风化砂堰体的研究

a. 振冲法加密的现场研究. 1988 年和 1989 年两次在现场进行过振冲法加密风化砂堰体的研究.成果表明,采用 30 kW 等不同功率的振冲器,振后的风化砂相对密度 D_r 可达 0.70 以上,若采用多个振

冲器组合形式施工还可提高工效.

b. 爆振法的加密研究.曾采用室内钢罐和在室外填土场上进行爆振法的加密研究现场试验,爆后的 $D_r > 0.7$,干密度 $1.7 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$,振后砂面平均沉降率一般在 4.5% ~ 6.7% 之间.

上述两种方法均可满足加密的要求.

7.2 快速造孔设备研究

本项研究内容包括 ①冲击反循环钻机 CF-1 型改制与钻孔施工试验;②泥浆回收技术;③控制钻孔铅直度技术,要求控制偏斜在 0.2% 左右;④双轮滚铣挖槽机的可能性研究和钻头设计.该双轮铣挖槽机后来由外国直接进口,其工效很高,主要在河床深槽段的部分风化砂部位使用.

8 结 语

多年来,三峡二期围堰的建设一直是有关领导、业主和建设各方担心的问题,是影响整个工程建设成败的关键,存在许多技术难点,必须采用具有国际先进水平的新技术、新工艺、新材料、新机具,只有进行高水平的组织管理,才能克服重重困难,顺利完成施工任务.

参考文献:

[1] 潘家铮.对二期围堰建设的评价[J].中国三峡建设(工程科技版),1999(5):1~3.
[2] 王家柱.二期横向围堰工程的几个主要技术问题[J].中国三峡建设(工程科技版),1999(5):4~7.
[3] 包承纲.二期围堰建设中若干关键技术问题的解决[J].中国三峡建设(工程科技版),1999(5):32~33.
[4] 刘松涛,包承纲. '98 汛期二期围堰防渗墙应力和变形[J].中国三峡建设(工程科技版),1999(5):43~45.
[5] 李青云,孙厚才,李思慎,等.二期围堰防渗墙材料检测 and 施工质量控制[J].中国三峡建设(工程科技版),1999(5):41~43. (收稿日期 2001-01-20 编辑 张志琴)

· 简讯 · 我国已建成 654 个农村水电初级电气化县

农村水电初级电气化建设是党中央、国务院为解决我国贫困地区脱贫致富所采取的一项重大举措,由水利部负责组织实施.自 20 世纪 80 年代中期以来,先后共安排了第三批建设.第一批安排在“七五”期间,原计划 100 个县,到 1990 年实际通过验收,完成了 109 个县,超额完成了预定目标.第二批安排在“八五”期间实施,原计划 200 个县,到 1995 年实际建成了 208 个县,又是超额完成了任务.第三批安排在“九五”期间实施,原计划 300 个县,但到 2000 年底,实际完成了 337 个县,更大幅度地超额完成了原定计划.总的来说,在 20 世纪我国共建成了 654 个农村水电初级电气化县,成绩是显著的.

以第三批这 300 多个县为例,在这 5 年间,国内生产总值从 2345 亿元增加到 4778 亿元,增长了 1 倍,农民人均年收入从 1082 元增加到 1914 元,增长了 76%,工业产值占工农业总产值的比重增长了 9 个百分点,使一大批农村剩余劳动力转移到工业生产上去.实践证明,农村水电初级电气化建设为加快贫困山区和少数民族地区的经济增长、结构调整、脱贫致富以及生态建设是卓有成效的.

据悉,“十五”期间水利部将再安排 400 个农村水电初级电气化县建设任务,到 2005 年,我国将有上千个农村水电初级电气化县.

(吴 高供稿)